

ALPINE KLIMAGESCHICHTE VOM HOHEN MITTELALTER
BIS IN DIE GEGENWART –
WAS UNS JAHRINGE UND HISTORISCHE QUELLEN ERZÄHLEN*

von Ulf Büntgen und Jürg Luterbacher

1 Einleitung

Genauso wenig wie sozioökonomische und politische Rahmenbedingungen während der letzten 1000 Jahre im Alpenraum als statisch angesehen werden dürfen, hat sich auch das Klima innerhalb dieses Zeitraums mehrmals und vor allem nachhaltig verändert. Während sich landwirtschaftliche Anbaumethoden und -räume, sowie Siedelungsgenese und -strukturen stets den sich ändernden naturräumlichen Gegebenheiten anzupassen vermochten, ist es das Klimasystem selbst, welches den alpinen Lebensraum prägt.

Die sich im Folgenden auf jüngste, zum Teil noch unveröffentlichte Ergebnisse paläo-klimatologischer Untersuchungen – also der Erforschung vergangener Klimabedingungen – berufende Zusammenfassung erhebt keinesfalls den Anspruch auf quantitative Vollkommenheit. Vielmehr ist es den Autoren ein Anliegen, in groben Zügen und möglichst allgemeinverständlich die wichtigsten Etappen alpiner Klimageschichte vom Hohen Mittelalter bis in die Gegenwart zu skizzieren. Eine kurze Einführung in die aktuelle Klimadebatte und die methodischen Vorgehensweisen der Dendroklimatologie und der historischen Klimatologie sollen dem interessierten Leser ergänzend zur Seite stehen. Zur vertieften Lektüre verweisen die Autoren auf englischsprachige Primärliteratur, wagen jedoch nachstehend den Versuch, die Quellenverweise auf das Nötigste zu reduzieren – zu manigfaltig erscheint deren internationale Publikation an dieser Stelle.

* Dank: Die in der vorliegenden Arbeit zusammengetragenen Ergebnisse aus der Dendroklimatologie basieren sowohl auf der Datengrundlage als auch der wissenschaftlichen Expertise zweier EU-Projekte ALP-IMP (#EVK-CT-2002-00148) und MILLENNIUM (#017008), deren Teilnehmern und Partnern an dieser Stelle ausdrücklich gedankt sei. Die Autoren wurden vom Oeschger Centre for Climate Change Research an der Universität Bern unterstützt.

2 Stand der aktuellen Klimadebatte

Themen rund um den Klimawandel sind längst in unserem Alltag manifestiert, gehören zum festen Bestandteil tagespolitischer Meinungsbildung und werden zunehmend lobbyistisch instrumentalisiert. Spätestens bei detaillierter Betrachtung fällt jedoch auf, dass der jüngst zu beobachtende Klima-Aktionismus auf einer nur teilweise fundierten Datengrundlage basiert – realistische CO₂-Budgetierungen und die sich daraus ableitenden Reduktionen bis 2050 sind nur wenig quantifiziert. Ernüchternd muss also festgehalten werden: Die medial inszenierte und politisch angewandte Polemik hat den wissenschaftlichen Kenntnisstand längst überholt. Die zeitliche Dynamik der jüngst entfachten Klima-Hysterie setzt die logische Abfolge von Erkenntnisgewinnung, Interpretation und Umsetzung ausser Kraft und gefährdet somit das Nachhaltigkeitsprinzip.

Seit Anfang des 19. Jahrhunderts müssen durch den Menschen verursachte Emissionen von Treibhausgasen innerhalb der Atmosphäre bei Untersuchungen unseres Klimasystems berücksichtigt werden. Der Gebrauch fossiler Brennstoffe sowie landwirtschaftliche Nutzung und Industrialisierung sind zu den Hauptverursachern der seit ~200 Jahren steigenden Treibhausgase avanciert.¹ Durch die Zunahme der Treibhausgase ist die Annahme berechtigt, dass globale Mitteltemperaturen und regionale Wetterextreme bereits zugenommen haben und auch in Zukunft noch weiter zunehmen werden.² Für das 21. Jahrhundert berechnen gekoppelte Computermodelle einen globalen Temperaturanstieg von 3 bis 5 °C.³ Um den Einfluss steigender Treibhausgase auf das Klimasystem zu verstehen und robuste Abschätzungen zukünftiger Klimaentwicklungen berechnen zu können, ist es jedoch erforderlich, deren Rolle in einem längeren Zeitraum zu reflektieren. Dies ist aber nur dann möglich, wenn wir die interne Dynamik unseres Klimasystems mit und ohne anthropogen bedingtem, sprich mit und ohne den vom Menschen verursachten CO₂-Anstieg vergleichen können. An dieser Stelle wird die Relevanz vorindustrieller Klimabedingungen deutlich. Die Rekonstruktion vergangener Klimaschwankungen innerhalb der letzten 500 bis 2000 Jahre stellt also eine wesentliche Herausforderung in der aktuellen Klimadebatte dar.⁴

Um Klimabedingungen vor dem Zeitalter flächendeckender instrumenteller Wetterbeobachtungen, also grob vor Beginn des 20. Jahrhunderts (in Europa seit etwa dem Ende des 18. Jahrhunderts) zu verstehen, bedarf es indirekter Aufzeich-

1 IPCC 2007, Climate Change 2007, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge (United Kingdom)/New York.

2 Ebd.

3 Ebd.

4 NRC (National Research Council), Surface Temperature Reconstructions for the Last 2000 Years, Washington DC 2006.

nungen. Dies geschieht mit Hilfe von so genannten Proxy-Daten (lat. proximus für sehr nahe). Hierbei handelt es sich um indirekte Klimazeiger oder Klimazeugen: Archive, welche Rückschlüsse auf vergangene Zustände der Atmosphäre und des Klimas zulassen.⁵ Wir unterscheiden zwischen natürlichen und gesellschaftlich-kulturellen Proxy-Daten⁶ (siehe Details nachstehend). Zu der ersten Gruppe zählen organische Quellen wie Jahrringe (im Folgenden detailliert beschrieben), Tier- und Pflanzenreste, Pollen und Torfbildungen. Dazu kommen nicht organische Befunde aus Eisbohrkernen, Seesedimenten und Gletscherständen. Innerhalb der Gruppe der gesellschaftlichen Proxy-Archive seien besonders die Dokumentenaufzeichnungen erwähnt. Es handelt sich hierbei meist um historische Schriften aus kirchlichen Einrichtungen, kommunalen Registern, Logbüchern oder Reiseberichten. Derartige Quellen können, wenn auch versteckt, wichtige klimatische Informationen enthalten wie beispielsweise Beschreibungen von Naturkatastrophen, Witterungsverläufen, Wasserständen von Seen und Flüssen, von deren Vereisungen, von der Dauer der winterlichen Schneebedeckung, von Blüte- und Reifezeiten von Kulturpflanzen, sowie Berichte über Erntetermine und Weinmesterträge.⁷ Individuelle Stärken und Schwächen der unterschiedlichen Proxy-Archive sowie deren methodische Bearbeitung und Synthese sind in zahlreichen Arbeiten detailliert beschrieben.⁸ Festzuhalten ist an dieser Stelle lediglich, dass Proxy-Daten in der Regel an instrumentellen Messungen kalibriert werden müssen: dimensionslose Indizes (z. B. Jahrringbreiten, Stärke von Sedimenten, Isotopenverhältnisse aus Eisbohrkernen) werden über eine Eichperiode (Kalibration) in °Celsius, mm Niederschlag resp. in einen adäquaten Klimaparameter umgewandelt (transformiert).

5 Z. B. Phil D. Jones, Keith R. Briffa, Tim J. Osborn, Janice M. Lough, Tas D. van Ommen, Bo M. Vinther, Jürg Luterbacher, E. R. Wahl, Francis W. Zwiers, Michael E. Mann, Gavin A. Schmidt, Caspar M. Ammann, Brendan M. Buckley, Kim M. Cobb, Jan Esper, Hugues Goosse, Nicholas Graham, Eystein Jansen, Thorsten Kiefer, Christoph Kull, Marcel Küttel, Ellen Mosely-Thompson, Jonathan T. Overpeck, Nadja Riedwyl, Michael Schulz, Alexander W. Tudhope, Ricardo Villalba, Heinz Wanner, Eric Wolff, Elena Xoplaki, High-resolution paleoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects, in: *The Holocene* 19 (2009), S. 3–49 (und darin enthaltene Referenzen).

6 Christian Pfister, *Wetternachhersage: 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen* (1496–1995), Bern 1999, S. 304; Christian Pfister, Jürg Luterbacher, Heinz Wanner, David Wheeler, Rudolf Brázdil, Q. Ge, Z. Hao, Claudio Prieto, Anders Moberg, Stefan Grab, *Documentary evidence as climate proxies*, «White Paper» 2009 [<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/paleo.html>].

7 Rudolf Brázdil, Christian Pfister, Heinz Wanner, Hans von Storch, Jürg Luterbacher, *Historical climatology in Europe – The State of the Art*, in: *Climatic Change* 70 (2005), S. 363–430; Christian Pfister et al. (Anm. 6).

8 Z. B. Phil D. Jones et al. (Anm. 5).

Heute dienen diese Proxy-Daten primär zur Rekonstruktion vergangener Temperatur- und Niederschlagsschwankungen sowie zur Abschätzung weiterer Klimaparameter wie Luftdruck und Trockenheit.⁹ Besonderes Interesse gilt in diesem Zusammenhang der Rekonstruktion einer Warmphase vor ~1000 Jahren. Diese Epoche, welche man in Europa als Mittelalterliches Klimaoptimum bezeichnet, ist in ihrer Dauer, Intensität und räumlichen Verbreitung kaum verstanden.¹⁰ Auf das Mittelalterliche Klimaoptimum folgte eine ausgedehnte Kaltphase. Diese so genannte Kleine Eiszeit reichte von der Mitte des 14. bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts und wurde durch den gleichzeitig mit der Industrialisierung einsetzenden aktuellen Erwärmungstrend, gipfelnd im Rekordsommer von 2003, abgelöst.¹¹

Auch wenn die hier angeführte Auflistung der existierenden Proxy-Archive auf den ersten Blick als durchaus solide erscheinen mag, sei gleichwohl angemerkt, dass ihre exakte Auswertung und raum-zeitliche Verteilung sich in der wissenschaftlichen Praxis als nur wenig zuverlässig erweist. Kurzum, wir verfügen über zu wenig klimarelevante Informationen (zeitlich hoch aufgelöst, präzise datiert und einen einzigen Klimaparameter widerspiegelnd), die räumlich gut verteilt sind und gleichzeitig auch weit genug in die Vergangenheit zurück reichen.¹² Die aktuellen Herausforderungen der Paläo-Klimaforschung lassen sich wie folgt zusammenfassen: reduzierte Datenverfügbarkeit, unzureichendes Verständnis langfristiger Klimavariabilität und deren Steuergrößen, sowie ein grosser Fehlerbereich generell kurzer Rekonstruktionen (Abb. 1). Sechs Forschungsschwerpunkte leiten sich ab: (1) Aufbau von interdisziplinären Datenbanken,¹³ (2) Verwendung

9 Überblick in IPCC (Anm. 1).

10 Jan Esper, Robert J.S. Wilson, David C. Frank, Anders Moberg, Heinz Wanner, Jürg Luterbacher, Climate: past ranges and future changes, in: *Quaternary Science Reviews* 24 (2005), S. 2164–2166; Jan Esper, David C. Frank, The IPCC on a heterogeneous Medieval Warm Period, in: *Climatic Change* 94 (2009), S. 267–273.

11 Ulf Büntgen, David C. Frank, Daniel Nievergelt, Jan Esper, Summer temperature variations in the European Alps, A.D. 755–2004, in: *Journal of Climate* 19 (2006), S. 5606–5623; Jürg Luterbacher, Daniel Dietrich, Elena Xoplaki, Martin Grosjean, Heinz Wanner, European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500, in: *Science* 303 (2004), S. 1499–1503; Christoph Schär, Pier Luigi Vidale, Dieter Lüthi, Christoph Frei, Christian Häberli, Mark Liniger, Christof Appenzeller, The role of increasing temperature variability for European summer heat waves, in: *Nature* 427 (2004), S. 332–336.

12 Jan Esper, Edward R. Cook, Fritz H. Schweingruber, Low-frequency signals in long tree-ring chronologies and the reconstruction of past temperature variability, in: *Science* 295 (2002), S. 2250–2253; Jürg Luterbacher et al. (Anm. 11); Elena Xoplaki, Jürg Luterbacher, Heiko Paeth, Daniel Dietrich, Niklaus Steiner, Martin Grosjean, Heinz Wanner, European spring and autumn temperature variability and change of extremes over the last half millennium, in: *Geophysical Research Letters* 32 (2005), L15713.

13 Z.B. Christian Pfister, Urs Dietrich-Felber (Eds.), *Euro-Climhist: A database on past weather and climate in Europe and its human dimension*, Version 2006-02-01, National Center of Competence in Research on Climate, Bern, Zugriff unter [<http://www.euroclimhist.com>].

innovativer Rekonstruktionsmethoden unter Berücksichtigung (3) bestehender und neuer Daten, (4) Verwendung dieser Informationen zur Abschätzung natürlicher und anthropogen bedingter Klimaschwankungen, (5) Überprüfung etablierter gekoppelter regionaler Klimamodelle, (6) Vorhersagbarkeit, mit welcher Wahrscheinlichkeit Temperatur und Niederschlag in Zukunft kritische Schwellenwerte für Mensch und Umwelt überschreiten.

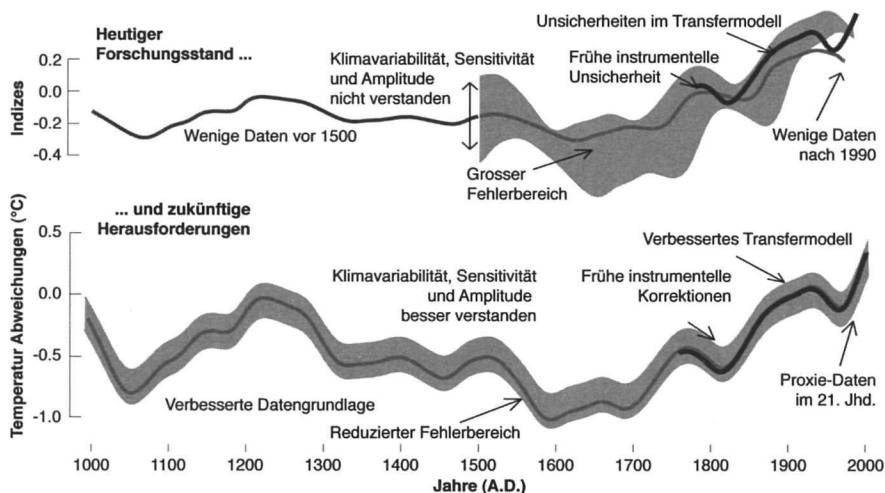


Abb. 1: Aktueller Forschungsstand und zukünftige Herausforderungen zum Verständnis natürlicher und anthropogen beeinflusster Klimaschwankungen der letzten ~1000 Jahre, skizziert durch das EU Projekt MILLENNIUM (#017008)

3 Methoden der Paläoklimatologie mit Schwerpunkt Jahrringforschung

Die als Jahrringforschung bezeichnete Dendrochronologie (griech. dendron = Baum, chronos = Zeit, logos = Logik) umfasst alle Teilgebiete, die den rinden-nächsten Jahrring zur Datierung verwenden. Der Begriff Dendrochronologie geht auf den amerikanischen Astronomen Andrew E. Douglass (1867–1962) zurück. Heute ist sie als Datierungsmethode in der Geowissenschaft, der Archäologie, der Kunstwissenschaft und Denkmalpflege längst etabliert. Die Dendroökologie hingegen adressiert Fragestellungen, welche sich mit der Rekonstruktion vergangener Umweltbedingungen, wie etwa dem Klima (Dendroklimatologie) beschäftigen und entwickelt sich stetig weiter. Für einen räumlichen und inhaltlichen Überblick verweisen wir auf Schweingruber.¹⁴ Jährlich aufgelöste Jahrringdaten kön-

14 Fritz H. Schweingruber, Tree rings and environment – dendrochronology, Bern 1996, S. 609.

nen mehr oder weniger flächendeckend in allen aussertropischen Waldökosystemen erhoben werden. Die gewonnenen Jahrringzeitreihen sind in ihrer absoluten Länge an die nacheiszeitliche Rückkehr der Wälder (in Mitteleuropa ~14.000 Jahre v. Chr.) gebunden.¹⁵ Basierend auf den jahreszeitlich bedingten Zuwachszonen eines Baumes lassen sich in bestimmten Fällen fundierte Rückschlüsse auf deren steuernde Einflussfaktoren gewinnen.¹⁶ Die Wirkung eines einzelnen Faktors klar zu bestimmen ist erfahrungsgemäss jedoch sehr schwierig. Innerhalb der gemässigten Zonen ist das Wachstum der Bäume generell von mehreren Umweltfaktoren gleichzeitig abhängig. Um dieses Problem zu minimieren, konzentriert sich die Dendroklimatologie auf Bäume, deren Wachstum von möglichst wenigen Umwelteinflüssen kontrolliert wird. Das jährliche Wachstum von Bäumen an ihrer oberen oder nördlichen Verbreitungsgrenze wird durch die innerhalb der Vegetationsperiode auftretenden Temperaturschwankungen gesteuert. Neben der Jahrringbreite, die mit dem geringsten Aufwand erhoben werden kann, wird vor allem die Jahrringdicke gemessen (Abb. 2). Vereinfacht ausgedrückt, reflektieren breite Jahrringe sowie eine hohe Holzdicke warme und lange Sommer, wenn die Bäume (meist Nadelbäume) nahe ihrer thermischen Verbreitungsgrenze (nördliche oder obere Waldgrenze) wachsen. Im Umkehrschluss weisen reduzierte Zuwachsraten und geringe Holzdichten auf kühle und kurze Vegetationsperioden hin.

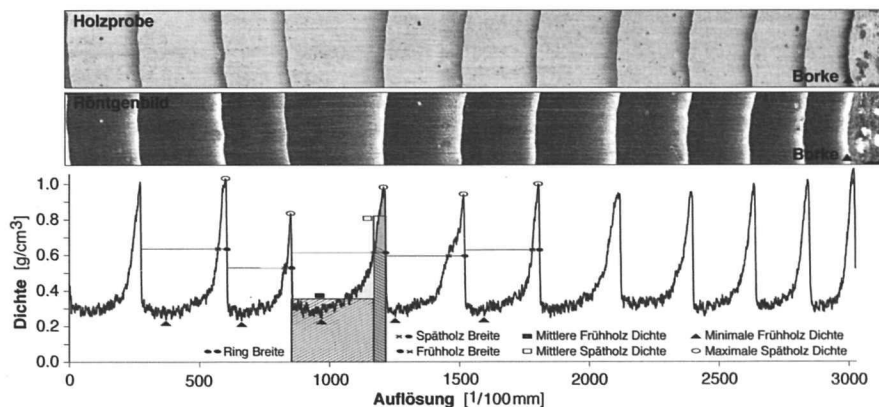


Abb. 2: Vergleich der am häufigsten in der Dendroklimatologie verwendeten Jahrringparameter: Breite und Dichte. Sie stellen die primäre Datengrundlage zur Rekonstruktion vergangener Umweltbedingungen der letzten 500–2000 Jahre dar, und werden bereits seit den 1970er-Jahren an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf, Schweiz gemessen

- 15 Marcus Schaub, Ulf Büntgen, Klaus Felix Kaiser, Bernd Kromer, Sahra Talamo, Katrine Krog Andersen, Sune Olander Rasmussen, Lateglacial environmental variability in Swiss tree rings, in: *Quaternary Science Reviews* 27 (2008), S. 29–41.
- 16 Harold C. Fritts, *Tree rings and climate*, London 1976, S. 567.

Synchrones Jahrringwachstum über grössere Gebiete (regional bis kontinental) ermöglicht eine präzise Datierung historischer Holzproben unterschiedlicher Herkunftsorte (z. B. aus Gebäuden und Flussschottern). Die durch äussere Einflüsse, beispielsweise das Klima, bedingte charakteristische Abfolge unterschiedlich breiter Jahrringe und dichter Zellstruktur gewährleistet die kalendarische Zuordnung eines jeden Ringes, solange er sich mit bereits datierten Proben überlagert (cross-dating). Mit anderen Worten: Die für eine Region und Periode typische Abfolge klimatisch gesteuerter Zuwachsmuster ist vergleichbar mit einem genetischen Fingerabdruck. Qualität und Aussage der Datierung hängen jedoch entschieden von der zur Verfügung stehenden Probenanzahl sowie ihrer zeitlichen Überlappung ab.¹⁷

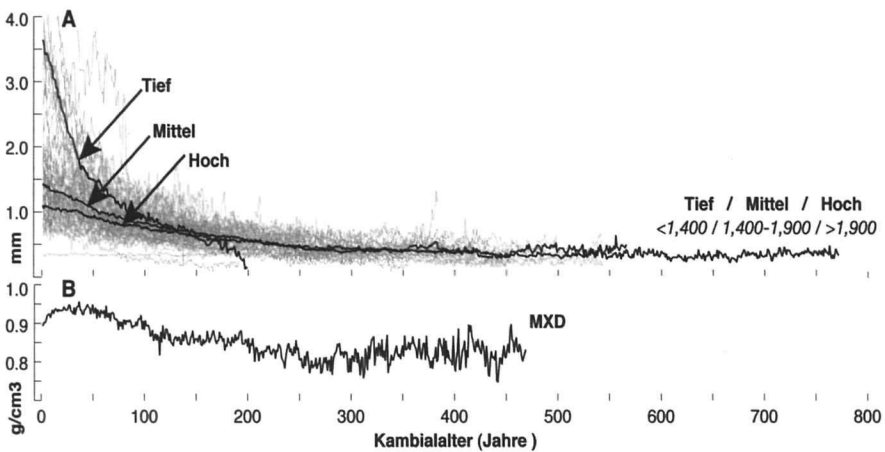


Abb. 3 A: Die nach ihrem Geburtsalter (Kambialalter) sortierten Mittelkurven (grau) beschreiben den kollektiven Alterstrend, repräsentativ für einen Standort und eine Baumart. Die drei schwarzen Kurven stellen den für unterschiedliche Höhenstufen typischen Alterstrend dar. B: Der kollektive Alterstrend aller Dichtemessungen (MXD)¹⁸

Neben den hier erwähnten Stärken der Dendroklimatologie ist es jedoch wichtig darauf hinzuweisen, dass Rohwertmessungen der Jahrringbreite (in mm) und auch der maximalen Spätholzdicke (in g/cm³) in der Regel von einem nicht-klima-

17 Ulf Büntgen, Jan Esper, Ignaz Bellwald, Hans Kalbermatten, Martin Schmidhalter, Henning Freund, Werner Bellwald, Burkhard Neuwirth, 700 years of settlement and building history in the Lötschental/Valais, in: *Erdkunde* 60 (2006), S. 96–112.

18 Verändert nach Ulf Büntgen, David C. Frank, Marco Carrer, Carlo Urbinati, Jan Esper, Improving Alpine summer temperature reconstructions by increasing sample size, in: Ireneusz Malik et al. (eds.), *Tree rings in archaeology, climatology and ecology*, (TRACE, 7) 2009, S. 188–195.

tisch bedingten, langfristig abnehmenden Trend, dem so genannten Alterstrend, überlagert werden (Abb. 3A–B).

Dieser abnehmende Trend in Jahrringbreite (Abb. 3A) bzw. -dicke (Abb. 3B) mit zunehmendem Baumalter muss vor einer klimatischen Begutachtung eliminiert werden, ansonsten hohe Kurvenpunkte in einer Mittelwert-Chronologie, die lediglich durch junge Jahrringe verursacht wurden, eine rein klimatische Interpretation des Baumwachstums nicht zulassen.¹⁹ Diese zwingende Notwendigkeit der Trendeliminierung stellt die primäre Herausforderung in der modernen Dendroklimatologie dar. Durch die Anwendung von Trendeliminierungsverfahren kann es gelingen, diesen Alterstrend zu beseitigen und klimatisch bedingte gemeinsame Wachstumsvariationen zu betonen. Da der Alterstrend in aller Regel aber einer langfristigen Abnahme der Jahrringbreite und -dicke gleicht, sind die Mittel kompliziert, dieses unerwünschte Rauschen von potenziell gleichgerichteten Klimasignalen zu trennen. Dies bedeutet, dass im Fall eines langfristigen Abkühlungstrends dieser in seiner Form dem unerwünschten Alterstrend ähnlich ist. Die Trennung dieser Informationen ist also keineswegs als trivial zu bezeichnen.²⁰

Als gemeinsame Wachstumsvariationen werden negative und positive Ausschläge der Jahrringbreiten bzw. -dicken verstanden, die synchron zwischen den Bäumen eines Standorts und schliesslich synchron zwischen den Standorten eines Untersuchungsgebietes aufgezeichnet werden. Derartig synchrones Wachstumsverhalten innerhalb und zwischen Standorten kann nur durch klimatische Variationen verursacht werden, da allein diese grossräumig und einheitlich wirksam sind. Ihre zeitliche Stabilität sollte jedoch durch den Vergleich mit langen instrumentellen Messreihen über unterschiedliche und unabhängige Zeitfenster oder gleitende Korrelationen überprüft werden. Verhalten sich Klima/Wachstums-Beziehungen linear, und kann der Nachweis von synchronem Wachstum zwischen Bäumen und Standorten erbracht werden, ist die Grundlage für eine Rekonstruktion von Umwelt- resp. Klimabedingungen anhand von Jahrringen gegeben.

Nachdem der primäre Einflussfaktor des Jahrringwachstums definiert ist, müssen die dimensionslosen Indizes der standardisierten Jahrringbreiten- und/oder -dicke-Chronologien durch Transfermodelle in den korrespondierenden Klimaparameter (meist Sommertemperatur) umgewandelt werden. Neben komplexen, nichtlinearen Regressionsmodellen, welche multiple Variablen berücksichtigen

19 Harold C. Fritts (Anm. 16).

20 Jan Esper, Edward R. Cook, Paul J. Krusic, Ken Peters, Fritz H. Schweingruber, Tests of the RCS method for preserving low-frequency variability in long tree-ring chronologies, in: *Tree-Ring Research* 59 (2003), S. 81–98.

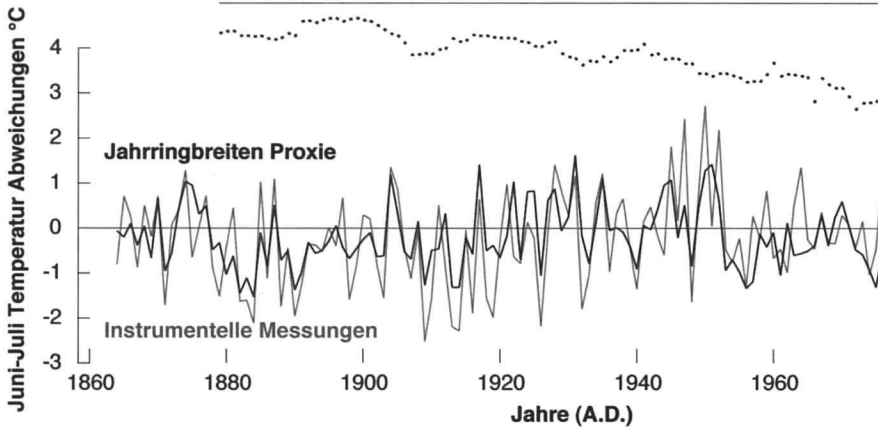


Abb. 4: Skalierung (Anpassung des Mittelwertes und Standardabweichung) einer über den gesamten Alpenraum gemittelten Lärchenchronologie aus ~2500 Jahrringbreiten Einzelserien von 40 Standorten (schwarz) an gemessene und homogenisierte Sommertemperaturen (grau)²¹

und auch zeitlich flexibel sind, wird in vielen Fällen auf einfache Modelle zurückgegriffen. Abb. 4 stellt den zeitlichen Zusammenhang zwischen dem gegenwärtigen Ende einer Jahrringbreitenchronologie (schwarz) und für den Alpenraum gemittelten Juni–Juli-Temperaturen (grau)²² dar. Der Mittelwert und die Standardabweichung der Proxy-Zeitreihe wurden den korrespondierenden Werten der instrumentellen Messungen über die gesamte Periode der Überlappung (1864–2003) angepasst. Beide Zeitreihen beschreiben einen Anstieg vom Ende des 19. Jahrhunderts bis ~1950, gefolgt von kühleren Temperaturen bis ~1980 sowie den aktuellen Erwärmungstrend der beiden letzten Dekaden und korrelieren mit $r = 0.70$. Die zeitliche Stabilität des Modells wird durch gleitende Korrelationen überprüft. Während die Korrelationen in der frühen Überlappungsperiode durchschnittlich höher sind, fallen sie zum rezenten Ende stetig ab, sind jedoch für das gesamte Zeitfenster 1864–2003 signifikant ($r = 0.85$ – 0.40).

21 Verändert nach Ulf Büntgen, David Frank, Robert Wilson, Marco Carrer, Carlo Urbinati, Jan Esper, Testing for tree-ring divergence in the European Alps, in: *Global Change Biology* 14 (2008), S. 2443–2453.

22 Ingeborg Auer et al. (31 co-authors), HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region, in: *International Journal of Climatology* 27 (2007), S. 17–46.

Tabelle 1: Typen von klimageschichtlichen Daten²³

<i>Inhalt</i>	<i>Archive der Natur</i>		<i>Archive der Gesellschaft</i>	
<i>Direkte Beobachtungen</i> von Wetter und Klima und instru- mentelle Mes- sungen			<i>Beschreibungen</i> - Wettertagebücher - Naturkatastrophen - Logbücher - Windstärke - ...	<i>Messdaten</i> - Temperatur - Niederschlag - Luftdruck - Wasserstände - ...
<i>Indirekte oder Proxy-Daten</i> Spuren klima- tisch beein- flusster Pro- zesse	<i>organische</i> - Baumringe - fossile Pollen - fossile Hölzer - Überreste von Pflanzen und Tieren - ...	<i>nicht organische</i> - Eisbohrkerne - Tropfsteine - Moränen - Sedimente - ...	<i>Historische Dokumente</i> <i>organische</i> - Blütezeit Pflanzen - Erntetermine - ...	<i>nicht organische</i> - Wasserstände von Flüssen und Seen - Vereisung von Flüssen und Seen - ...
			<i>kulturelle</i> - Bittprozessionen	<i>bildhafte</i> - Bildquellen (z. B. Gletscher)
			<i>epigrafische</i> - Hoch- und Niedrig- wassermarken	<i>archäologische</i> - Überreste von Stätten

Neben der hier am Beispiel der Jahrringdaten exemplarisch dargestellten Vorgehensweise zu Klimarekonstruktionen ist speziell für Europa und den Zeitraum der letzten 100 bis 500 Jahre weiterhin festzuhalten, dass zusätzliche Klimainformationen zur Verfügung stehen. Im letzten Teil der so genannten Kleinen Eiszeit sind es vornehmlich instrumentelle Messungen, die längste aus Zentralengland reicht bis ins Jahr 1659 zurück. Je weiter wir zeitlich zurückblicken, umso weniger gemessene Informationen liegen vor. Zwei verschiedene Typen indirekter Klimainformationen, so genannte Proxy-Daten, können unterschieden werden: Einerseits Informationen aus natürlichen Archiven (zum Beispiel Eisbohrkerne aus Grönland, Baumringdaten aus verschiedenen Regionen Europas, siehe oben, Korallen aus dem Roten Meer, etc.) andererseits Anhaltspunkte aus verschiedenen schriftlichen Überlieferungen (Tab. 1). Professor Christian Pfister von der Universität Bern ist ein Pionier, der in akribischer Kleinarbeit über Jahrzehnte die verschiedenen historischen Quellen analysiert, ausgewertet und in so genannten

23 Vereinfacht nach Christian Pfister 1999 (Anm. 6); ergänzt nach Christian Pfister et al. 2009 (Anm. 6).

Niederschlags- und Temperaturindizes umgesetzt hat. Er war es auch, der die historische Klimatologie international gefördert hat.

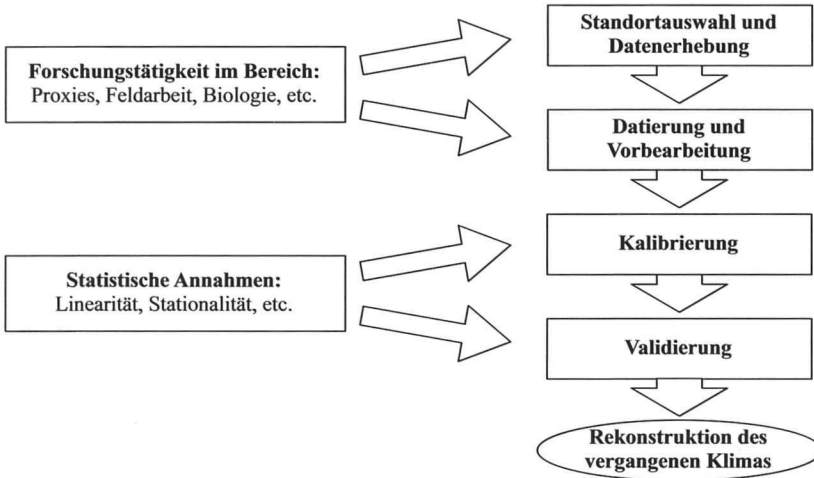


Abb. 5: Schematisches Diagramm zur Klimarekonstruktionsmethodik²⁴

Mit geeigneten statistischen Methoden können all diese Klimazeugen aus historischen und natürlichen Archiven kombiniert werden. Dabei werden die Proxy-Informationen im 20. Jahrhundert an instrumentellen Daten geeicht. Ein statistischer Zusammenhang zwischen den Proxy-Daten und der Zielvariablen (Temperatur, Niederschlag) wird in einer entsprechenden Kalibrierungsperiode hergestellt und in einer unabhängigen Verifikationsperiode überprüft. Die erhaltenen statistischen Beziehungen werden dann für die Rekonstruktion der vorinstrumentellen Periode verwendet (Abb. 5). Dies erlaubt schliesslich Klimarekonstruktionen in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zurück bis in die Kleine Eiszeit (Abb. 6 und 7).

24 Verändert nach NRC (Anm. 4).

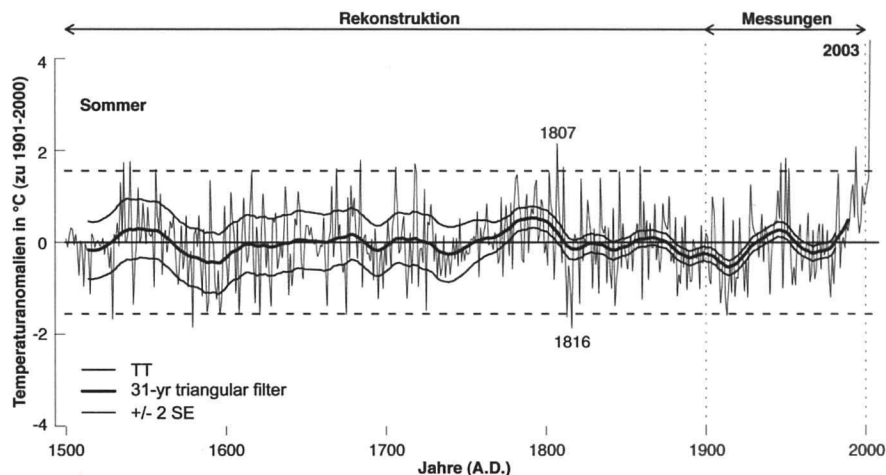


Abb. 6: Alpine Sommertemperaturabweichungen (gegenüber dem Mittel 1901–2000) für die Periode 1500–2003. Für 1500–1900 sind die Werte Rekonstruktionen, die Werte von 1901–2003 stammen von instrumentellen Informationen. Die dicke schwarze Linie stellt die 31-jährig gefilterte Kurve dar. Die gestrichelten horizontalen Linien bezeichnen die ± 2 Standardabweichungen im 20. Jahrhundert dar. Die Unsicherheiten der Rekonstruktionen sind mit ± 2 Standardfehlern dargestellt (dünne Bänder)²⁵

Rechte Seite Abb. 7 A: Zeitliche Verteilung von 180 Jahrringproben aus lebenden Bäumen und aus Balken historischer Häuser. Die jüngeren Holzproben ab A.D. 1200 stammen aus dem Lötschental und wurden mit spätmittelalterlichen Proben aus Simplon Dorf kombiniert.²⁶ B: Jährlich aufgelöste alpine Juni-September-Temperaturrekonstruktion berechnet aus der maximalen Spätholzdicke der 180 Jahrringserien.²⁷ Die schwarze Linie stellt Variationen oberhalb von 20 Jahren dar, und die schwarzen Boxen zeigen jeweils die zehn wärmsten und kältesten Dekaden an. C: Vergleich von zwei unabhängigen Sommertemperaturrekonstruktionen aus dem Alpenraum (schwarz: maximale Spätholzdicke von 180 Proben²⁸ und grau: Jahrringbreite von 1527 Proben.²⁹ D: Vergleich der regionalen Temperaturvariationen mit grossräumigen Schwankungen der nördlichen Hemisphäre.³⁰ Alle Rekonstruktionen haben über das gemeinsame Zeitfenster A.D. 951–1979 einen Mittelwert von 0 und eine Standardabweichung von 1 und wurden mit einem 40-jährigen Filter geglättet. Die vertikalen Balken deuten Phasen geringer Sonnenaktivität an³¹

25 Ebd.

26 Ulf Büntgen et al. 2006 (Anm. 11 und 17).

27 Ulf Büntgen et al. 2006 (Anm. 17).

28 Ulf Büntgen et al. 2006 (Anm. 11).

29 Ulf Büntgen, Jan Esper, David C. Frank, Kurt Nicolussi, Martin Schmidhalter, A 1052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures, in: *Climate Dynamics* 25 (2005), S. 141–153.

30 Jan Esper et al. (Anm. 12); Anders Moberg, Dmitry M. Sonechkin, Karin Holmgren, Nina M. Datsenko, Wibjörn Karlén, Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data, in: *Nature* 433 (2005), S. 613–617 und Rosanne D'Arrigo, Rob Wilson, Gordon Jacoby, On the long-term context for late twentieth century warming, in: *Journal of Geophysical Research* 111 (2006) [doi:10.1029/2005JD006352].

31 Minze Stuiver, Thomas F. Braziunas, Atmospheric C-14 and century-scale solar oscillations, in *Nature* 338 (1989), S. 405–408.

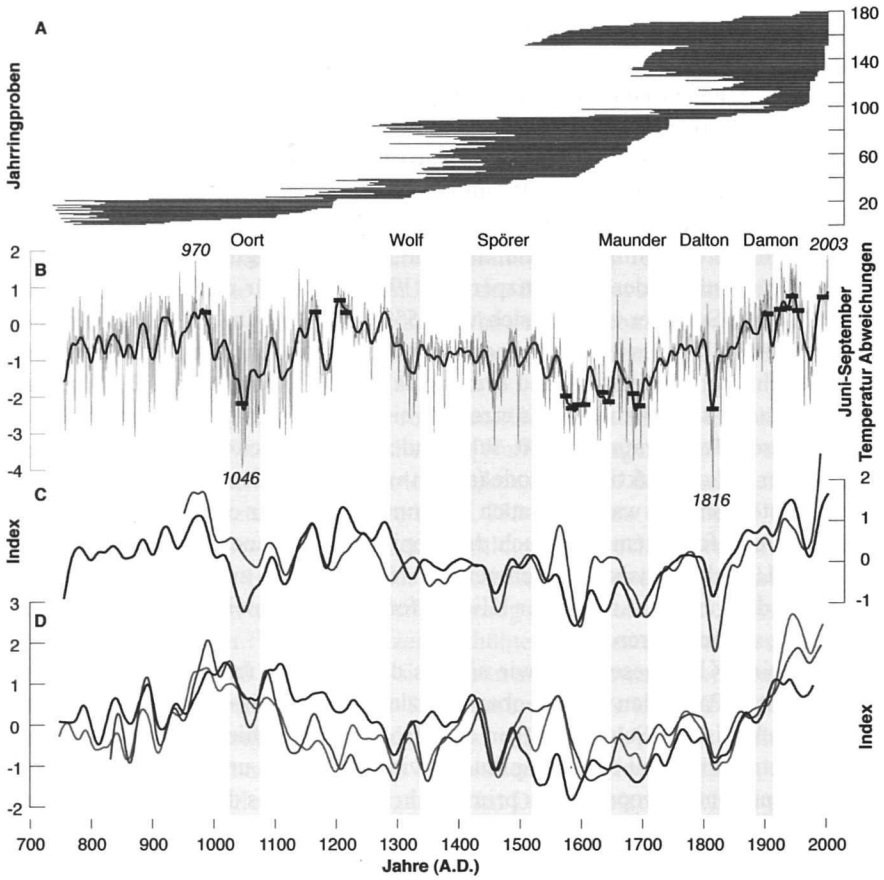


Abb. 7 A, B, C und D (siehe linke Seite)

4 Alpine Klimageschichte der letzten 500 bis 1250 Jahre

Casty et al.³² haben lange instrumentelle Temperaturreihen, abgeleitete Temperaturrekonstruktionen aus Dokumenteninformationen sowie natürliche Proxy-Daten (Tab. 1) verwendet und in einem statistischen Ansatz (Abb. 6) die Sommertemperaturen über den alpinen Raum (46.25–48.25°N und 4.25–5.75°E, sowie 43.25–45.25°N und 5.75–16.25°E) zurück bis A.D. 1500 rekonstruiert. Abb. 6 zeigt die mittleren Sommer (Mittel aus Juni, Juli und August) Temperaturabweichungen (gegenüber der Referenzperiode 1901–2000) für die Periode 1500 bis 2003. Warme Sommer zeigten sich um 1550, zum Teil im 17. Jahrhundert, in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts, in der Mitte des 20. Jahrhunderts und schliesslich über die letzten rund dreissig Jahre. Der Sommer von 2003 scheint der wärmste seit 1500 zu sein. Er erreichte eine Abweichung von knapp 5 °C von der mittleren Temperatur des 20. Jahrhunderts. Der zweitwärmste Sommer innerhalb der Rekonstruktionsperiode (sprich vor 1900) ist für das Jahr 1807 belegt. Der kälteste Sommer war 1816, auch bekannt als das Jahr ohne Sommer. Dieser Kälteeinbruch folgt dem Ausbruch des tropischen Vulkanes Tambora (siehe unten). Die Unsicherheitsbalken nehmen bis 1500 deutlich zu. Dies lässt sich vor allem auf die geringe Anzahl der Klimainformationen sowie auf ihre räumliche Verteilung zurückführen.

Die alpine Klimageschichte wie sie aus der Sicht der Jahrringe erzählt wird, zeigt gewisse Parallelen zu den oben skizzierten Ergebnissen im Bereich jährlicher bis dekadischer Schwankungen auf; grösste Unterschiede beziehen sich auf die rekonstruierte Temperaturamplitude zwischen Warm- und Kaltphasen.

Für Kontinentaleuropa sind es primär Jahrringdaten aus den Alpen, welche als verlässliche Archive zur jährlich aufgelösten Abschätzung vergangener Temperaturschwankungen bis ins Hohe Mittelalter verwendet werden (siehe nachstehende Quellen). Umfangreiche Analysen, welche sich über den gesamten Alpenbogen erstrecken, beschreiben einen deutlichen Zusammenhang zwischen jährlichem Kiefernwachstum (Stammproduktivität) und alpiner Klimavariabilität.³³ Ein Netzwerk aus 62 Lärchen (*Larix decidua* Mill.) und 62 Fichten (*Picea abies* Karst.) Standortchronologien mit ~4600 Einzelradien repräsentativ für grosse Teile des Alpenbogens, berücksichtigt unterschiedliche Höhenstufen (500–2300 m ü. NN) und konnte nur durch die Zusammenarbeit zahlreicher Institute aus unterschiedlichen Ländern (Frankreich, Italien, Österreich, Schweiz, Slowenien) ermöglicht werden.

32 Carlo Casty, Heinz Wanner, Jürg Luterbacher, Jan Esper, Reinhard Böhm, Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500, in: International Journal of Climatology 25 (2005), S. 1855–1880.

33 Ulf Büntgen et al. (Anm. 21).

Nachdem der Alterstrend der Einzelserien korrigiert wurde, konnten Korrelationen zwischen den 124 Jahrringchronologien und monatlich aufgelösten Temperatur- und Niederschlagsmessungen berechnet werden. Um Effekte des Vorjahres und die zeitliche Stabilität der Klima/Wachstum-Beziehung besser zu verstehen, wurden Korrelationen über ein 18-monatiges Zeitfenster von Mai aus dem Vorjahr bis Oktober im Jahr der Ringbildung und über unterschiedliche Perioden berechnet. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine starke Abhängigkeit zwischen Standorthöhe und Sommertemperaturen – das Temperatursignal innerhalb der Jahrringbreite nimmt mit der Höhe des Standortes stetig zu – für Lärchen deutlicher ausgeprägt ist als für Fichten. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von einem Netzwerk mit weiteren Koniferenarten in den Alpen³⁴ und der Slowakisch-Polnischen Tatra³⁵ nachgewiesen.

Basierend auf der Kenntnis einer robusten Klima/Wachstum-Beziehung ist es jüngst einer lokalen Studie im Lötschental (Wallis) gelungen, eine für die Schweizer Alpen repräsentative und lückenlose Rekonstruktion der jährlichen Sommertemperaturen der letzten 1250 Jahre (A.D. 755–2004) zu erstellen.³⁶ Neben der Beprobung zahlreicher nahe der oberen Waldgrenze wachsender Lärchen, wurden mehrere hundert Holzproben aus historischen Gebäuden innerhalb des Lötschentals entnommen und für die Verlängerung der Rekonstruktion bis ins frühe Mittelalter verwendet.³⁷ Die Studie zeigt erhöhte Temperaturen während des Mittelalters um A.D. 1000 herum, eine sich daran anschliessende, mehrhundertjährige Periode durchschnittlich kühlerer Temperaturen von A.D. 1300 bis 1850, sowie einen Erwärmungstrend während der letzten ~150 Jahre (Abb. 7). Auch wenn diese Grobgliederung in namentlich das Mittelalterliche Klimaoptimum, die Kleine Eiszeit und der aktuelle Temperaturanstieg im Detail – hierbei geht es primär um die räumliche Verbreitung der Mittelalterlichen Warmphase – zwar noch kontrovers diskutiert werden,³⁸ ist sie jedoch nunmehr wiederholt und von unabhängigen Untersuchungen unter Berücksichtigung verschiedenster Proxy-Archive bestätigt worden. Ausmass sowie das genaue zeitliche Auftreten dieser langfristigen Klimaschwankungen sind wohl am wenigsten verstanden und stellen somit die aktuelle Forschungsfront dar.³⁹ Allgemein wird das Mittelalterliche Klimaoptimum

34 David Frank, Jan Esper, Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network for the European Alps, in: *Dendrochronologia* 22 (2005), S. 107–121.

35 Ulf Büntgen, David C. Frank, Ryszard J. Kaczka, Anne Verstege, Tomasz Zwijacz-Kozica, Jan Esper, Growth/climate response of a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia, in: *Tree Physiology* 27 (2007), S. 689–702.

36 Ulf Büntgen et al. 2006 (Anm. 11).

37 Ulf Büntgen et al. 2006 (Anm. 17).

38 IPCC (Anm. 1).

39 Jan Esper, David C. Frank (Anm. 10).

mit einer Erhöhung der durchschnittlichen Temperaturen, vergleichbar mit denen des 20. Jahrhunderts, verbunden. In diesem Zeitabschnitt hat sich beispielsweise der Weinbau in weiter nördliche Gebiete bis England ausgedehnt und die thermisch bedingte Waldgrenze leicht nach oben (Alpen), resp. Norden (Eurasien) verschoben.⁴⁰ Demgegenüber war die Kleine Eiszeit speziell in den Alpen durch sich ausdehnende Gletscherflächen charakterisiert.⁴¹ Es traten teilweise extrem kalte Sommer auf, die Winter waren generell frostreicher und gelegentlich schneereicher, und das Zufrieren von Gewässern im Alpenvorland trat regelmäßig ein.⁴² Der weitgehend durch instrumentelle Messreihen belegte und in den Jahrringen aufgezeichnete Erwärmungstrend der letzten rund zwei Jahrhunderte gipfelt schliesslich im zentraleuropäischen Rekordsommer von 2003,⁴³ dessen Temperaturen wohl als die höchsten innerhalb der letzten 1250 Jahre anzunehmen sind.⁴⁴ Um die Ergebnisse besser zu verstehen, ist es hilfreich, die Temperaturgeschichte mit deren potentiellen Einflussfaktoren zu vergleichen. Aus Eisbohrkernen gewonnene Isotopenverhältnisse (Beryllium¹⁰) können als Indikator der Sonnenaktivität auf der Erde verwendet werden.⁴⁵ Dekadische Schwankungen stimmen mit dem Temperaturverlauf weitgehend überein. Als weitere natürliche Steuergrösse des hier berücksichtigten vorindustriellen Temperaturverlaufes muss eruptiver Vulkanismus genannt werden.⁴⁶

Ein Vergleich zwischen der für den Alpenraum ermittelten Temperaturgeschichte und grossräumigen Rekonstruktionen, wie sie teilweise für die nördliche Hemisphäre existieren, ergibt im Bereich langfristiger Variationen ein erstaunlich harmonisches Bild. Jährlich auftretende Schwankungen bis hin zu dekadischen Fluktuationen überlagern sich jedoch weniger gut. Dennoch sind wohl einige der im dekadischen Bereich stattfindenden Temperatureinbrüche von eher grossräumiger Natur. Das Hauptaugenmerk der gewonnenen Ergebnisse liegt zweifelsohne auf dem Verhältnis der beiden Warmphasen ~1000 und heute zueinander. Auch wenn die beobachteten Temperaturverläufe zwar mit grosser Wahrscheinlichkeit anhand von zahlreichen sowie unabhängigen Untersuchungen, basierend auf einer durchaus guten Datengrundlage, bestätigt werden können, sind Aussagen über die weit in der Vergangenheit liegenden Klimaschwankungen eher ungenau. Je

40 Horace Hubert Lamb, The feearly medieval warm epoch and its sequel, in: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 1 (1965), S. 13–37.

41 Hanspeter Holzhauser, Michel Magny, Heinz J. Zumbühl, Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years, in: *The Holocene* 15 (2005), S. 789–801.

42 Christian Pfister (Anm. 6).

43 Jürg Luterbacher et al. 2004 (Anm. 11); Christoph Schär et al. 2004 (Anm. 11).

44 Ulf Büntgen et al. 2006 (Anm. 11).

45 Edouard Bard, Martin Frank, Climate change and solar variability: What's new under the sun?, in: *Earth and Planetary Science Letters* 248 (2006), S. 1–14.

46 Alan Robock, Volcanic eruptions and climate, in: *Reviews of Geophysics* 38 (2000), S. 191–219.

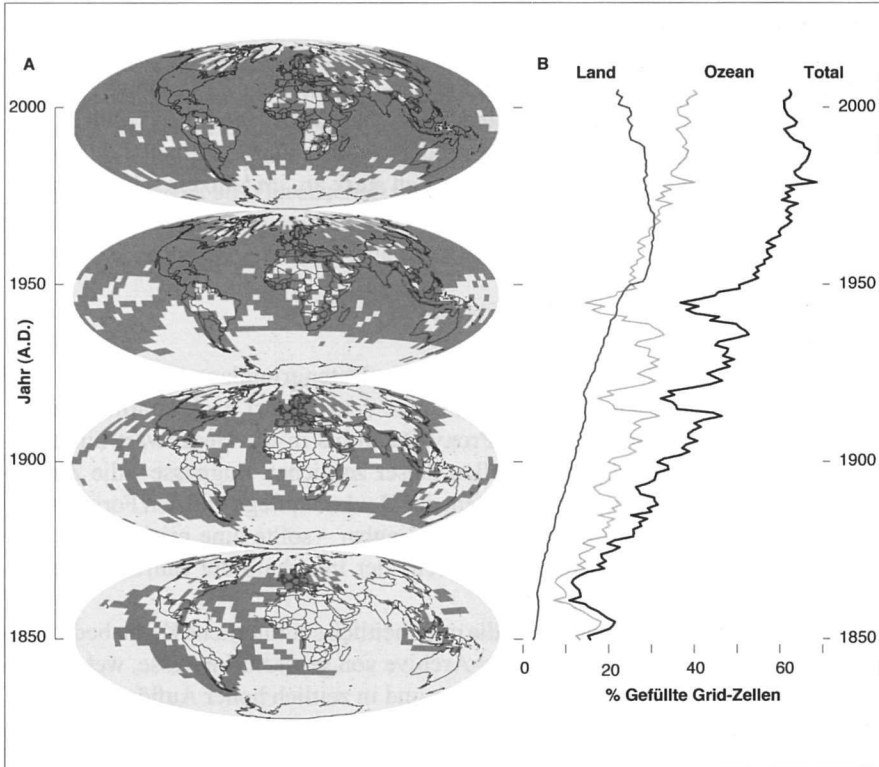


Abb. 8 A: Räumliche und B: zeitliche Verteilung instrumenteller Messdaten⁴⁷

weiter wir uns in die Vergangenheit zurück wagen, desto ungenauer werden unsere Kenntnisse. Verantwortlich sind hierfür mehrere Faktoren: Neben methodisch bedingter Unsicherheit ist es speziell die mit zunehmendem Alter stattfindende Reduzierung des zur Verfügung stehenden Datenmaterials. Besonders gravierend erscheint eine Schere zwischen wärmeren, instrumentell gemessenen, und kühleren, proxy-basierten Sommertemperaturrekonstruktionen, wie sie von aktuellen Arbeiten aus den europäischen Alpen und der nördlichen Hemisphäre vor

47 Aus: Philip Brohan, John J. Kennedy, Ian Harris, Simon F.B. Tett, Phil D. Jones, Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850, in: *Journal of Geophysical Research* 111D12106 (2006) [doi:10.1029/2005JD006548], verändert nach: David Frank, Ulf Büntgen, Reinhard Böhm, Maurizio Maugeri, Jan Esper, Warmer early instrumental measurements versus colder reconstructed temperatures: shooting at a moving target, in: *Quaternary Science Reviews* 26 (2007), S. 3298–3310.

~1850, resp. ~1900 beschrieben wird.⁴⁸ Da jedes Proxy-Archiv über ein Transfermodell in Grad Celsius umgewandelt werden muss, ist die Güte des (raum-zeitlichen) Zusammenhangs zwischen indirekten und direkten Zeitreihen besonders wichtig. Qualität und Quantität meteorologischer Aufzeichnungen nehmen also entscheidenden Einfluss auf den Verlauf der rekonstruierten Klimabedingungen. Ihre Verfügbarkeit nimmt jedoch mit der Zeit stark ab, im Umkehrschluss nimmt ihre Unsicherheit zu (Abb. 8).

5 Ausblick

Ausblickend sei auf die immer noch zu dünne Datengrundlage besonders in der ersten Hälfte des letzten Jahrtausends, sowie dem Bedarf nach kontinuierlicher Erneuerung und Verlängerung der Proxy-Daten bis in die Gegenwart hingewiesen. Neben dem beständigen Auffüllen dieser zeitlichen Engpässe – die Zusammenarbeit mit archäologischen Diensten, der Denkmalpflege und den Forstämtern ist aus dendroklimatologischer Sicht unabdingbar – sollte eine methodische Verbesserung des Erkennens und Modellierens der innerhalb der Jahrringe gespeicherten Klimainformationen stehen.

Neben Baumringinformationen, die mehrheitlich sommerliche Klimabedingungen widerspiegeln, sind andere Proxy-Archive von grossem Interesse, welche Klimainformationen zu anderen Jahreszeiten und in zeitlich hoher Auflösung liefern. Hierzu können Informationen aus schriftlichen Aufzeichnungen, auch aus dem Alpenraum,⁴⁹ einen grossen Beitrag leisten. Diese Informationen sind einmalig und beinhalten häufig auch Beschreibungen zu Wetterextremen wie Hitzewellen, Überschwemmungen, Stürmen, Starkschneefällen, Lawinen etc., welche vor allem für die Gesellschaft grosse Relevanz haben. Jeder Proxy hat seine Vor- und Nachteile in Bezug auf das Verständnis des vergangenen Klimas.⁵⁰ Dabei sollten Unsicherheiten in den Rekonstruktionen verringert werden. Wichtig in diesem Zusammenhang sind nicht nur gute Daten, sondern auch eine statistische Methodik, welche die Stärken und Schwächen optimal integrieren kann, mit dem Ziel, Unsicherheiten im vergangenen Klima zu reduzieren. Aus Perspektive der historischen Klimatologie müssen besonders weiterführende Vergleiche der Jahrringchronologien mit unabhängigen Archiven, wie zum Beispiel historischen Quellen, in den Vordergrund rücken, um eine anschliessende Herausarbeitung von so-

48 David Frank et al. (Anm. 47).

49 Z. B. Christian Pfister (Anm. 6); Gregor Zenhäusern, Witterung und Klima eines Walliser Alpenteils nach Aufzeichnungen (1770–1812) des Weibels Johann Ignaz Inderschnitten von Binn, in: Blätter aus der Walliser Geschichte XL (2008), S. 141–220.

50 Für einen Überblick s. Phil D. Jones et al. (Anm. 5).

zioökonomischen Konsequenzen durch interdisziplinäre Forschungsprojekte zwischen Natur- und Sozialwissenschaftlern zu erleichtern. Es geht darum Klimawissenschaftler aus den verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen sowie Physiker, Historiker, Ökonomen und Experten aus weiteren Disziplinen an einen Tisch zu bringen, um das Verständnis des vergangenen Klimawandels und die Auswirkungen auf Gesellschaft und Wirtschaft gemeinsam anzugehen. Diese Punkte werden im Rahmen des NCCR Klima, im europäischen Programm MILLENNIUM sowie anderen nationalen und internationalen Programmen behandelt.